

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕНЦИАЛА ПИТТИНГООБРАЗОВАНИЯ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ PREN И MARC ДЛЯ АУСТЕНИТНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Проведены расчеты показателей PREN (эквивалентное число сопротивления стали питтинговой коррозии) и MARC (степень легирования стали для обеспечения сопротивления коррозии) для Cr-Mn, Cr-Mn-Ni и Cr-Ni аустенитных коррозионностойких сталей с азотом и без азота. Приведены результаты исследования питтинговой коррозии (ПК) сталей в 3,5%-м водном растворе NaCl. На основе показателей PREN и MARC предложены корреляционные уравнения расчета потенциала питтингообразования ($E_{\text{пит}}$).

Ключевые слова: высокоазотистая сталь, питтинговая коррозия, потенциал питтингообразования, PREN, MARC.

Calculations of PREN (Pitting resistance equivalent number) and MARC (Measure of alloying for resistance to corrosion) to Cr-Mn, Cr-Mn-Ni and Cr-Ni-C austenitic stainless steels with/without nitrogen were made. The research results of pitting corrosion (PC) of steels in 3,5%-NaCl aqueous are presented. On the basis of indicators PREN and MARC were proposed correlation equations for the calculation of pitting formation potential (E_{pit}).

Keywords: High nitrogen steel, pitting corrosion, pitting formation potential, PREN, MARC.

Азот, находящийся в твердом растворе, повышает стойкость аустенитных коррозионностойких сталей к общей, точечной и щелевой коррозии [1]. На сегодняшний день существует и принято научным сообществом два показателя, определяющие стойкость стали к коррозионному воздействию.

Как известно, сопротивление питтинговой коррозии может быть оценено путем использования показателя PREN. В работе [2] уравнение для расчета показателя PREN коррозионностойкой стали представлено в следующем виде:

$$PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + k \times \%N, \quad (1),$$

где содержание элементов в сплаве выражено в мас. %, а k – коэффициент, меняющийся в диапазоне от 13 до 30, как было определено в работах [2, 6].

При изучении литературных источников, можно отметить различные значения коэффициента k у разных авторов. Так, в работах [3–5] показатель PREN вычисляют из уравнения:

$$PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 16 \times \%N, \quad (2)$$

В работах [6, 7] предлагается использовать другой коэффициент перед азотом:

$$PREN = \%Cr + 3.3 \times \%Mo + 20 \times \%N, \quad (3)$$

В работе [8] учтено влияние вольфрама и усилена роль азота:

$$PREN = \%Cr + 3.3 \times (\%Mo + 0.5\%W) + 30 \times \%N, \quad (4)$$

Другим показателем, позволяющим оценить коррозионную стойкость стали, является число MARC [1, 6, 9, 10], по которому стойкость против питтинговой и щелевой коррозии зависит от химического состава сплава и определяется в соответствии с корреляционным уравнением:

$$MARC = Cr + 3,3 \times Mo + 20 \times C + 20 \times N - 0,5 \times Mn - 0,25 \times Ni, \quad (5)$$

По данным работ [1, 9], корреляционное уравнение MARC применимо как к промышленным, так и к экспериментальным аустенитным коррозионно-стойким сталям важно для выбора состава стали. Хотя, по мнению автора [1], в настоящее время не существует фундаментального объяснения уравнения MARC, но оно показывает, например, что при повышении коррозионной стойкости стали 1 % азота эквивалентен 20 % хрома. Стоит отметить, что данное уравнение впервые рассматривает углерод, как фактор, положительно влияющий на коррозионные свойства стали в сочетании с азотом [10], в то время как никель и марганец оказывают отрицательное влияние [6].

Химический состав исследованных в работе сталей с указанием содержания элементов, необходимых для расчета показателей коррозионной стойкости, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав и показатели коррозионной стойкости сталей

№ п/п	Марка стали	Содержание элементов, мас. %						PREN	MARC	E _{питт} , В
		C	Mn	Cr	Mo	Ni	N			
1	06X18AG19M2	0,060	19,13	17,51	2,20	0,13	0,810	41,0	32,6	1,42
2	07X16AG13M3	0,070	12,76	16,16	3,24	0,11	0,820	43,3	38,2	1,37
3	12X18N10T	0,120	2,00	18,00	–	10,00	–	18,0	16,9	0,13
4	02X16N10M2	0,018	1,38	16,12	2,04	10,17	0,037	23,6	20,7	0,29
5	04X18N8	0,040	1,42	18,30	–	8,15	0,043	19,2	17,2	0,18
6	05X16N4D2	0,050	6,15	16,15	–	4,1	0,085	17,9	14,8	0,07
7	08X15D2	0,080	9,78	14,50	–	0,16	0,163	17,8	14,4	–0,02
8	06X15NM2	0,060	9,2	14,80	1,68	0,95	0,166	23,7	20,0	0,05
9	03X17N4G14	0,028	7,21	16,90	0,09	4,19	0,162	20,4	16,3	0,19
10	09X15NG9D2	0,094	8,98	15,35	0,10	1,16	0,133	18,3	15,4	0,07
11	09X16N2G9D2	0,092	8,61	16,13	0,06	1,73	0,169	19,7	16,8	0,04
12	02X16N10GM2Д	0,015	1,18	16,48	2,04	10,10	0,035	23,9	21,1	0,27
13	06X18N8ГД	0,062	0,84	18,04	0,19	8,04	0,035	19,4	18,2	0,21
14	07X16N4Г8Д2	0,071	7,54	16,10	0,18	4,07	0,085	18,4	15,0	0,10
15	05X15N9Г9М	0,050	9,00	9,00	1,00	15,00	0,150	15,3	8,1	–0,01
16	03X20N16Г5М3АБ	0,020	4,30	20,50	3,2	15,40	0,270	36,5	30,9	1,38
17	02X20N18М6АД	0,010	–	20,00	6,1	18,00	0,200	44,1	39,8	1,36
18	08X18N10T	0,080	2,00	18,00	–	10,00	–	18,0	16,1	0,53

В таблице приведены рассчитанные показатели PREN и MARC, причем показатель PREN рассчитывался по формуле (3), учитывающей усредненное значение коэффициента k . Полученные экспериментально при испытании ПК ранее [11, 12] и в данной работе значения потенциала $E_{\text{пит}}$ также показаны в таблице.

Целью работы было установление корреляционной зависимости между показателями PREN, MARC и $E_{\text{пит}}$.

С помощью программы Microsoft Excel были построены зависимости PREN и MARC от $E_{\text{пит}}$, которые показаны на рис. 1.

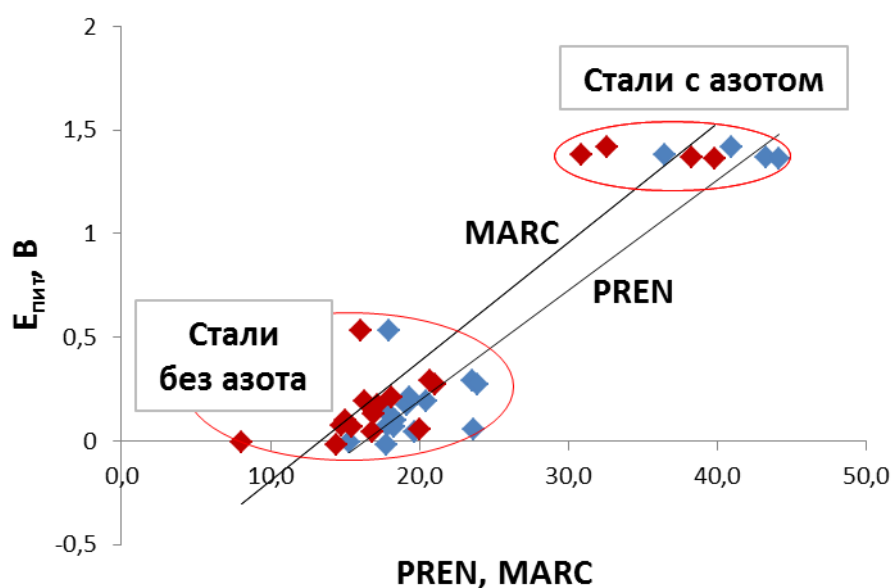


Рис. 1. Зависимость $E_{\text{пит}}$ от показателей PREN и MARC

Тогда с учетом уравнений линий тренда, корреляционное уравнение между PREN и $E_{\text{пит}}$ можно представить следующим образом:

$$E_{\text{пит}} = 0,0533 \times \text{PREN} - 0,8737, \quad (6)$$

а уравнение корреляции между MARC и $E_{\text{пит}}$ примет вид:

$$E_{\text{пит}} = 0,0574 \times \text{MARC} - 0,7643, \quad (7)$$

Следует отметить, что возможность использования данного подхода теоретического расчета $E_{\text{пит}}$ для аустенитных коррозионностойких сталей можно распространить и на другие классы коррозионностойких сталей, что потребует уточнения коэффициентов в соответствующих уравнениях.

Список литературы

1. Шнайдель М. О. Новые азотосодержащие аустенитные нержавеющие стали с высокими прочностью и пластичностью / М. О. Шнайдель. Металл. 2005. № 11 (605).
2. Tschietschin A. P. Surface Properties of HNS, in HNS 2003 (High-Nitrogen Steels) / A. P. Tschietschin, A. Toro ; ed. by M. O. Spiedel, C. Kowanda and M. Diener // Swiss Federal Inst. Technol., Zurich. 2003. P. 229–240.

3. *Gocmen A.* An alloy design of a case hardenable ferritic stainless steel, in Proceedings of 12th International Conference on High Nitrogen Steels / A. Gocmen // Energietechnik Essen GmbH, Hamburg. 2014. P. 30–37.
4. *Saller G.* High Nitrogen Alloyed Steels for Non-Magnetic Drill Collars Standard Steel Grades and Latest Developments, in HNS 2003 (High-Nitrogen Steels) / G. Saller, H. Aigner ; ed. by M.O. Spiedel, C. Kowanda and M. Diener // Swiss Federal Inst. Technol., Zurich. 2003. P. 129–138.
5. *Schneiders T.* Industrial Use of Austenitic and Duplex HNS-Manufacture, Application and Properties, in Proceedings of 12th International Conference on High Nitrogen Steels / T. Schneiders, R. Ritzenhoff, H.-P. Jung, C. Herrera, A. Bauch // Energietechnik Essen GmbH, Hamburg. 2014. P. 120–127.
6. *Niederhofer P.* High interstitial FeCrMnCN austenitic stainless steels for use in tribocorrosive environments, in Proceedings of 12th International Conference on High Nitrogen Steels / P. Niederhofer, S. Siebert, S. Huth, W. Theisen, H. Berns // Energietechnik Essen GmbH, Hamburg. 2014. P. 50–57.
7. *Seifert M.* New developments of martensitic stainless steels containing C+N, in Proceedings of 12th International Conference on High Nitrogen Steels / M. Seifert, S. Siebert, S. Huth, W. Theisen, H. Berns // Energietechnik Essen GmbH, Hamburg. 2014. P. 40–47.
8. *Harzenmoser M.* Welding of HighNitrogen Steels, in HNS 2003 (High-Nitrogen Steels) / Harzenmoser M. ; ed. by M.O. Spiedel, C. Kowanda and M. Diener // Swiss Federal Inst. Technol., Zurich. 2003. P. 179–188.
9. *Spiedel M. O.* High-Nitrogen Austenitic Stainless Steels, in HNS 2003 (High-Nitrogen Steels) / M. O. Spiedel, Mingling Zheng-Cui ; ed. by M. O. Spiedel, C. Kowanda and M. Diener // Swiss Federal Inst. Technol., Zurich. 2003. P. 63–73.
10. *Bernauer J.* Effect of Carbon in High-Nitrogen Corrosion-Resistant Austenitic Steels, in HNS 2003 (High-Nitrogen Steels) / J. Bernauer, M. O. Spiedel ; ed. by M. O. Spiedel, C. Kowanda and M. Diener // Swiss Federal Inst. Technol., Zurich. 2003. P. 159–168.
11. *Березовская В. В.* Исследование структуры, механических и коррозионных свойств новых высокоазотистых Cr-Mn-сталей с молибденом / В. В. Березовская, Р. А. Саврай, Е. А. Меркушкин, В. А. Макаров // Металлы. 2012. № 3. С. 31–39.
12. *Березовская В. В.* Влияние деформации на структуру, механические и коррозионные свойства высокоазотистой аустенитной стали 07X16AG13M3 / В. В. Березовская, М. С. Хадыев, Е. А. Меркушкин, Ю. А. Соколовская // Металлы. 2013. № 6. С. 54–62.